



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

LÁVKA PŘES JIHLAVU V TŘEBÍČI

PEDESTRIAN BRIDGE OVER THE JIHLAVA RIVER IN TŘEBÍČ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Vavříčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN KOLÁČEK, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Lukáš Vavříčka
Název	Lávka přes Jihlavu v Třebíči
Vedoucí práce	Ing. Jan Koláček, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	5. 6. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:

Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry

Základní normy:

ČSN 736201: Projektování mostních objektů

ČSN 73 6214: Navrhování betonových mostních konstrukcí

ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady

Literatura: na základě doporučení vedoucím práce

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na zadaný problém zpracujte dvě až tři studie lávky pro pěší o jednom poli včetně jejich zhodnocení. Dále se zaměřte na návrh vybrané konstrukce z betonu. Pro kolmý most můžete provést úpravy v niveletě, popř. v profilu řeky včetně délky přemostění.

Dimenzování proveďte podle mezních stavů v rozsahu stanoveném vedoucím práce.

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Podklady, studie a vizualizace

P2. Přehledné a podrobné výkresy zvoleného návrhu mostu

P3. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím práce)

Bakalářská práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě a pro ÚBZK 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Jan Kolářek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem betonové lávky pro pěší přes řeku Jihlavu. Byly vypracovány dvě předběžné varianty, z nichž jedna byla zpracována podrobně. Jedná se o zavěšenou konstrukci, jejíž hlavní nosnou částí jsou dva pylony vetknuté do dodatečně předejbaté mostovky, která je prostě uložena na opěrách. Zavěšení mostovky je realizováno pomocí kloubově připojených závěsů k vrcholům pylonů a k mostovce. Materiál nosných betonových částí je beton C45/55. Ocelové části nosné konstrukce jsou z oceli S355, závěsy jsou z oceli Macalloy 460. Posudky byly provedeny převážně ručním výpočtem s použitím programu MS Excel, k posouzení pylonu byl použit program FIN EC Beton. Výpočty účinků zatížení byly provedeny za pomoci programu Scia Engineer. Výkresové části práce byly zpracovány v programu AutoCAD a vizualizace v programu Lumion.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lávka pro pěší, zavěšená konstrukce, závěs, lávka, předpětí, beton.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with design of concrete pedestrian bridge over the Jihlava river. At the beginning two variants were created, one of which was future postprocessed. The cable-stayed construction, whose main support part is created by two pylons fixed to post-tensioned bridge deck, is pin-supported on abutment. Suspension of the deck is implemented by cables pin joined to the top of towers and sides of the deck. Material of the main concrete load-bearing structure is concrete C45/55. The steel elements of structure are made from steel S355, suspenders are designed with steel Macalloy 460. The structural assessment report was processed mostly by hand calculation with use of program MS Excel, for structural check of pylon use of program FIN EC beton was chosen. The load calculation was performed with program Scia Engineer. The drawing was created in AutoCAD software and the visualization in Lumion.

KEYWORDS

Pedestrian bridge, cable-stayed construction, suspender, footbridge, prestressed, concrete.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Lukáš Vavříčka *Lávka přes Jihlavu v Třebíči*. Brno, 2020. 32 s., 74 s. příl. Bakalářská práce.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí.
Vedoucí práce Ing. Jan Koláček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Lávka přes Jihlavu v Třebíči* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

Lukáš Vavříčka
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Lávka přes Jihlavu v Třebíči* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

Lukáš Vavříčka
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Kolářkovi Ph.D. za odbornou pomoc, věcné rady a vstřícný přístup při řešení problémů nad rámec školních osnov. Speciální poděkování patří mé rodině, která mě bezpodmínečně podporovala po celou dobu studia. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své přítelkyni a všem blízkým kamarádům, kteří mi byli morální oporou.

Obsah

1. Úvod	9
2. Identifikační údaje	10
3. Podklady	11
4. Varianty řešení	12
4.1. Varianta A	12
4.2. Varianta B	13
4.3. Výběr varianty	14
5. Geometrie	15
5.1. Pylon	15
5.2. Mostovka	15
5.3. Závěsy	16
6. Statické modely	17
6.1. Základní model	17
6.2. Model pro zatížení větrem	19
6.3. Deskový model	20
7. Předpětí konstrukce	21
7.1. Změna přepětí	21
8. Materiál	22
9. konstrukční řešení	23
10. Posouzení konstrukce	24
10.1. Zatížení	24
10.2. Mezní stav použitelnosti	24
10.3. Mezní stav únosnosti	26
11. Závěr	29
Seznam použité literatury	30
Seznam příloh	31
Seznam obrázků	32

1. ÚVOD

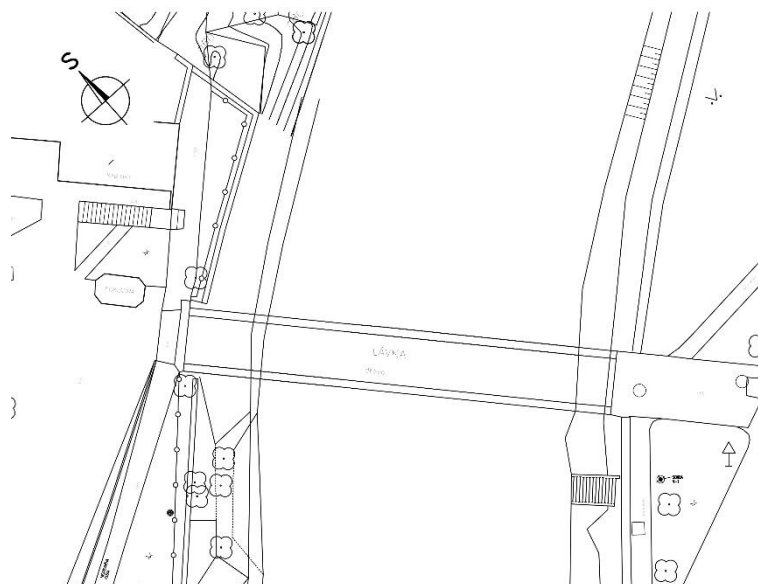
Práce je zaměřena na navržení nové lávky pro pěší a cyklisty. Konstrukce se nachází v rekreační části města Třebíč a řeší náhradu za stávající provizorní most. Konstrukční rozměry lávky budou uzpůsobené pro převedení komunikace se smíšeným provozem chodců a cyklistů. Překážkou přemostění je vodní tok Jihlava. Pro projekt byly vytvořeny dvě konstrukční řešení přemostění, kde právě zavěšená konstrukce byla podrobně zpracována jako předmět bakalářské práce.

2. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

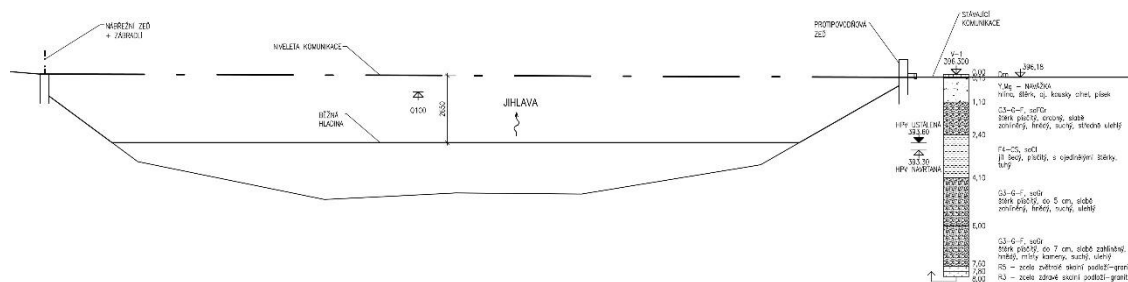
Název stavby:	Lávka přes řeku Jihlavu, Třebíč
Stavební objekt:	SO 201 – Lávka přes řeku Jihlavu, Třebíč
Místo stavby:	Třebíč Polanka 647 01 Třebíč
Kraj:	Kraj Vysočina
Okres:	Třebíč
Katastrální území:	KÚ Třebíč [769738], obec Třebíč [590266]
Investor:	Město Třebíč Karlovo náměstí 104/55 674 01 Třebíč
Komunikace:	Stezka pro pěší a cyklisty
Projektant:	Lukáš Vavříčka Číhošť 40 582 87 Číhošť

3. PODKLADY

Podklady pro zpracování projektu byly situační výkres s podélným řezem v místě stávajícího provizorního mostu včetně výškových úrovní průtoků a popisu geotechnických poměrů v místě stavby.



Obr. 1. Stávající situace



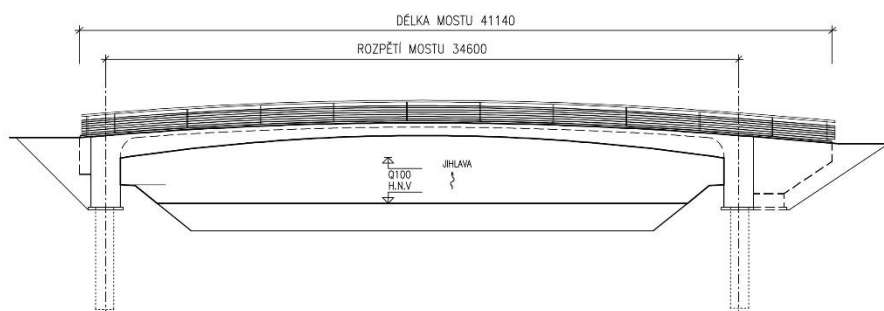
Obr. 2. Podélný řez

4. VARIANTY ŘEŠENÍ

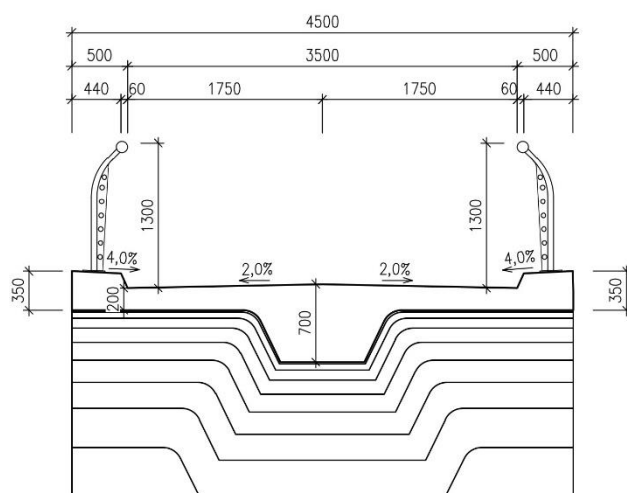
Pro předběžný návrh byly navrženy dvě varianty možného řešení. Důležitým prvkem pro řešení bylo dodržení konstrukčních zásad při přemostění vodotečí, tedy navrhnout dostatečnou minimální volnou šířku a výšku mostního otvoru. Vzhledem k možné úpravě nivelety komunikace, zde není problém toto kritérium dodržet.

4.1. Varianta A

První variantou je rámový most se zakřivenou střednicí. Nosný prvek mostovky je trám s náběhem vynášející mostovku. Mostovka je provedena se střechovitým sklonem s tloušťkou desky v nejnižším bodě 200 mm. Výška trámu uprostřed rozpětí je 465 mm a ve vetknutí 1065 mm. Celá konstrukce včetně stojek spolupůsobí jako rám podepřen podloží, které se chová jako pružná podpora. U konstrukce je třeba toto zohlednit ve výpočtovém modelu. Vhodný tvar střednice by vycházel ze zatížení, které by bylo převážně tvořeno vlastní tíhou. Vzhledem k náběhu trámu, kde zatížení vlastní tíhou roste k opěrám by se zvolila pravděpodobně parabola vyšších stupňů. Vodorovná síla, která by vznikala v patě oblouku by se eliminovala pomocí vnesení předpětí.



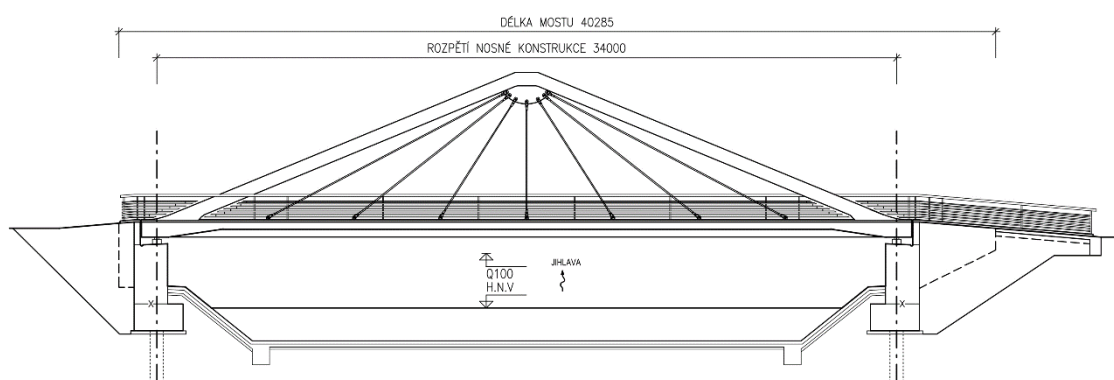
Obr. 3. Podélný řez varianty A



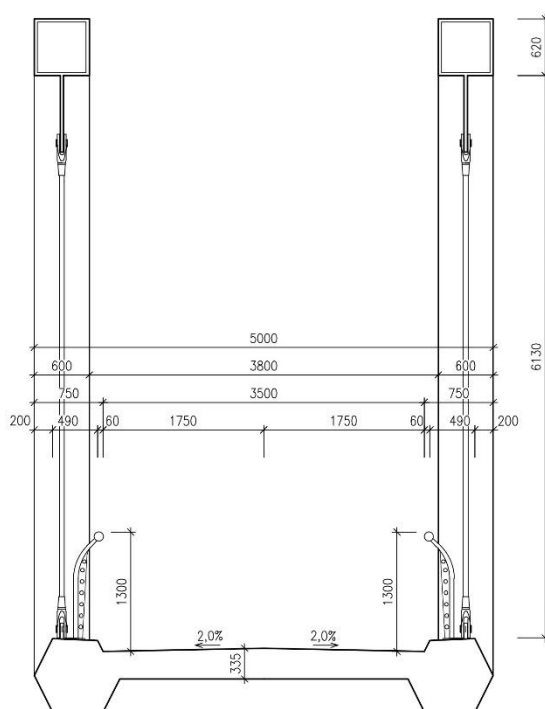
Obr. 4. Příčný řez varianty A

4.2. Varianta B

Druhá varianta je provedena jako zavěšená konstrukce s dolní mostovkou. Kde hlavní nosný prvek je tvořen dvěma zalomenými pylony, které jsou vetknuty do mostovky. Mostovka plní funkci táhla. Konstrukce by se dala přirovnat k Langerovu trámu. Tahová síla v mostovce se eliminuje předpětím mostovky. Lávka pak tvoří samokotevný konstrukční systém. Závěsy budou ukotveny ve vrcholu pylonů a v nosných trámech mostovky. Mostovka je provedena se střechovitým sklonem s tloušťkou v nejnižším bodě 200 mm. Trámy mostovky jsou mnohoúhelníky s největší výškou 800 mm.



Obr. 5. Podélný řez varianty B



Obr. 6. Příčný řez varianty B

4.3. Výběr varianty

Obě varianty jsou konstrukčně velmi odlišné především ve statickém působení a interakci s podloží. Každá konstrukce má nějaké výhody a nevýhody

Varianta A je z architektonického pohledu velmi elegantní řešení a snadno zapadne do okolního prostředí. Nevýhodou jsou vodorovné síly, které vznikají v patě oblouku a mají velký vliv na podloží.

Varianta B svým neobvyklým tvarem bude tvořit dominantu v okolí. Nevýhodou je výstavba konstrukce, která je složitější, ale nemá tak velký vliv na podloží.

I přes složitější výstavbu se pro zpracování práce volí varianta B, kvůli svému dominantnímu vzhledu.

5. GEOMETRIE

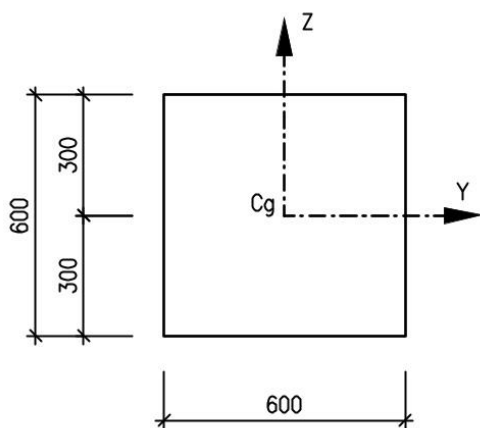
Zvolené návrhové charakteristiky vychází z podélného řezu a charakteru převáděné komunikace

Rozpětí lávky:	$L = 34,00 \text{ m}$
Rozpětí pole:	$L_{p1} = 4,25 \text{ m}$
Délka nosné konstrukce:	$L_{nk} = 35,40 \text{ m}$
Volná šířka lávky:	$ZŠ = 3,50 \text{ m}$
Šířka nosné konstrukce	$b_{nk} = 5,00 \text{ m}$

5.1. Pylon

Pylon je hlavní nosný prvek konstrukce. Výška pylonu se určila podle předpokladu klasické zavěšené konstrukce $h \approx 0,2 L$, kde L je rozpětí pole a h je výška pylonu nad mostovkou.

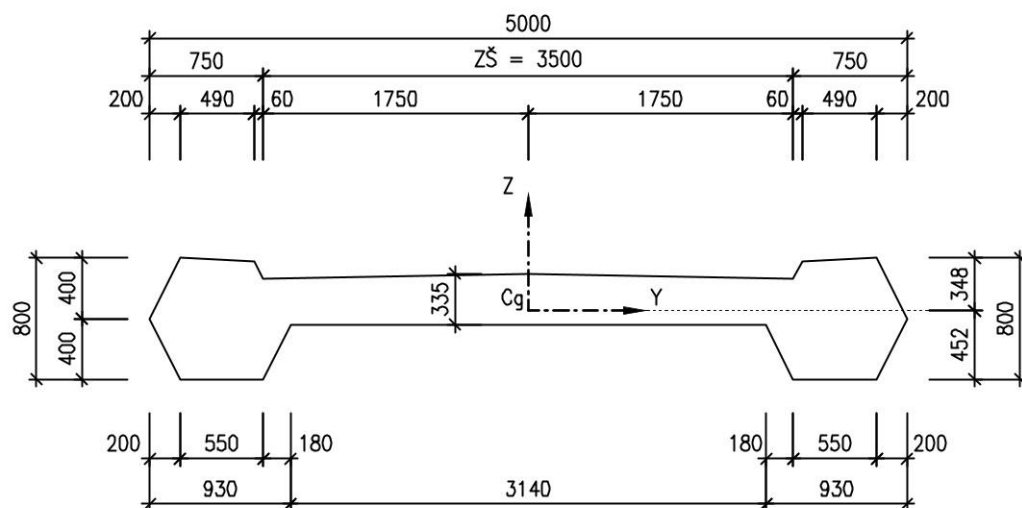
Pak $h = 0,2 \cdot 34 = 6,8 \text{ m}$, zvolená výška je $h = 7 \text{ m}$, což je teoretická vzdálenost střednic pylonu a mostovky.



Obr. 7. Průřez pylonu

5.2. Mostovka

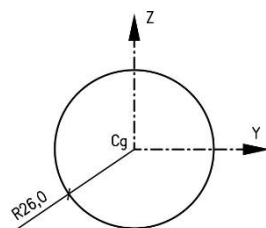
Průřez mostovky byl zvolen tak, aby mohl převést požadovanou komunikaci s volnou šířkou 3,5 m a bylo možné zakotvení závěsů a upevnění mostního příslušenství. V desce nejsou uvažovány ztužující žebra, jejich absenci nahrazuje větší tloušťka desky mostovky, která je 300–335 mm.



Obr. 8. Průřez mostovky

5.3. Závěsy

Závěsy jsou zvoleny Macalloy M56. Průměr závěsu je 52 mm. Závěsy jsou rovnoměrně rozděleny po obou stranách mostovky s teoretickou vzdáleností mezi kotvami 4,25 m.

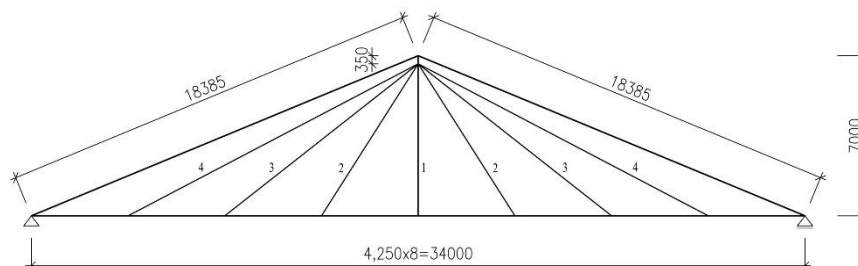


Obr. 9. Průřez závěsů

6. STATICKÉ MODELÝ

Modely konstrukce byly zpracovány v programu Scia Engineer. Celkově byly vytvořeny 3 modely, pro zjištění vnitřních sil dva prutové modely a jeden deskový. Všechny prvky měly nadefinované materiálové charakteristiky odpovídající navrženým materiálům.

6.1. Základní model



Obr. 10. Statické schéma základního modelu

Základní model je prutová konstrukce v rovině XZ, kde osa X prochází střednicí desky a osa Z je na ní kolmá. Vykreslení prvků bylo provedeno pomocí prutů. Složitý průřez mostovky byl vykreslen v programu AutoCAD a importován do výpočtového programu. Vzhledem k symetrii konstrukce v příčném i podélném směru je možné prutové prvky pylonu a závěsů, které jsou po obou stranách lávky vkládat s dvojnásobnou průřezovou plochou a uvažovat jejich společné působení ve střednici lávky. Tím je také zachována celková tíha konstrukce. Výsledné síly pro posouzení pylonu a závěsů pak vycházejí dvojnásobné, což bylo zohledněno při posudcích.

Mostovka byla vymodelována jako prostý nosník podepřená na obou koních kloubově na jednom konci se odebrala volnost ve směru osy X a Z a na druhém se odebrala volnost ve směru osy Z.

Pylon byl vykreslen jako dva pruty každý vetknutý na jednom konci mostovky a ve vrcholu. Průřez pylonu byl vymodelován jako obdélník o výšce 600 mm a šířce 1200 mm. Byla tak zachována ohybová tuhost ve svislém směru, která má vliv na průhyb mostovky. A také plocha odpovídající dvou průřezům pylonu.

Tuhé rameno ve vrcholu pylonu zohledňuje přesné ukotvení závěsů, které nebylo možné realizovat přímo do vrcholu kvůli stísněnému konstrukčnímu prostoru. Tuhé rameno bylo vymodelováno pomocí prutu s nulovou tíhou a průřez byl zvolen kruh o průměru 1 m průřezovými charakteristiky oceli S355.

Závěsy byly vymodelováno s průměrem $d_{z2} = 74,54$ mm, což odpovídá

$$d_{z2} = \sqrt{2} \cdot d_z,$$

kde $d_z = 52$ mm je průměr jednoho lana. Pruty závěsů byly připojeny k mostovce a k tuhému rameni za pomoci kloubů na konci prutů. U každého závěsu bylo nastaveno ve vlastnostech v kolonce FEM typ „pouze osově síly“, tím jsou uvažovány v prvku pouze osově síly, v tomto případě tahové síly.

Rektifikace závěsů

Pro správné fungování konstrukce je třeba vnést přetvoření do závěsů, čímž se zkrátí jejich délka, tak aby byl vyrovnán průhyb mostovky, který vzniká deformací pylonu a samotné mostovky. Pokud se provede vyrovnání správně, konstrukce se chová jako spojitý nosník s vnitřními pružnými podporami v místě závěsů.

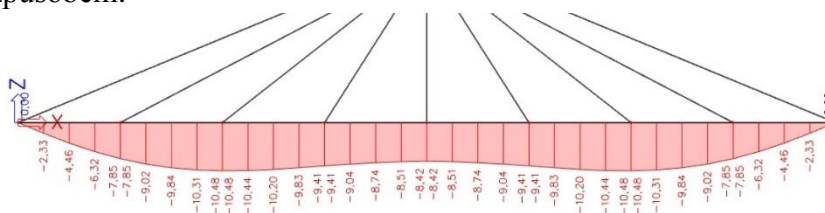
Rektifikace závěsů se provede ve dvou krocích.

1. krok: Vyrovnání průhybů a momentů od působení vlastní tíhy a ostatního stálého zatížení ke zjištění vnitřních sil pro předpětí tažené mostovky.

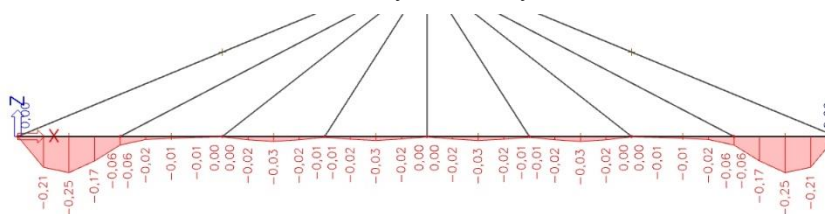
2. krok: Vyrovnání průhybů a momentů se započtenou předpínací silou, která ovlivňuje pokles vrcholu pylonu a celkové chování konstrukce, čímž bude docíleno výchozího stavu konstrukce.

Při výstavbě se rektifikace provede pouze v 1 kroku. Uvažuje se totiž předepnutí mostovky ještě před rektifikací závěsů, kdy bude mostovka uložena na bednění.

Síly pro zjištění potřebného přetvoření v závěsu se uvažují od působení vlastní tíhy a ostatního stálého zatížení. Normálová síla v závěsech způsobená tímto zatížením spolu s deformací ve vrcholu pylonu, slouží jako přibližná hodnota k vyrovnání průhybu na mostovce. Pro přesnější vyrovnání průhybů se dále přetvoření v závěsech upravuje iteračním způsobem.

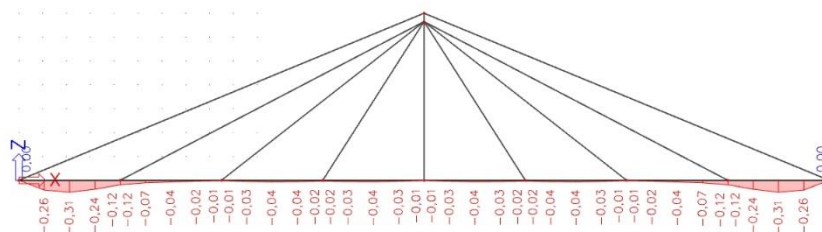


Obr. 11. Průhyb mostovky bez rektifikace

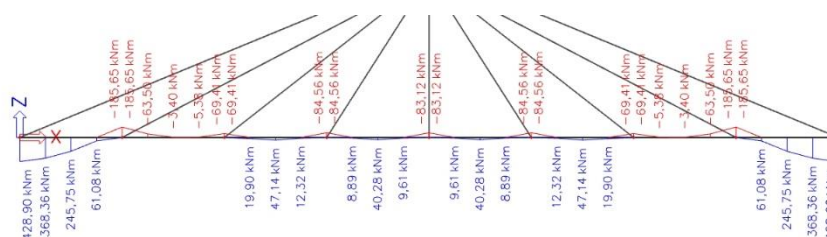


Obr. 12. Průhyb mostovky po vyrovnání

S tímto stavem viz. *obr. 12* se provedou potřebné výpočty k určení předpínací síly. Po zatížení konstrukce předpínací silou se iterační proces opakuje a nastavení závěsu je provedeno do finální podoby.

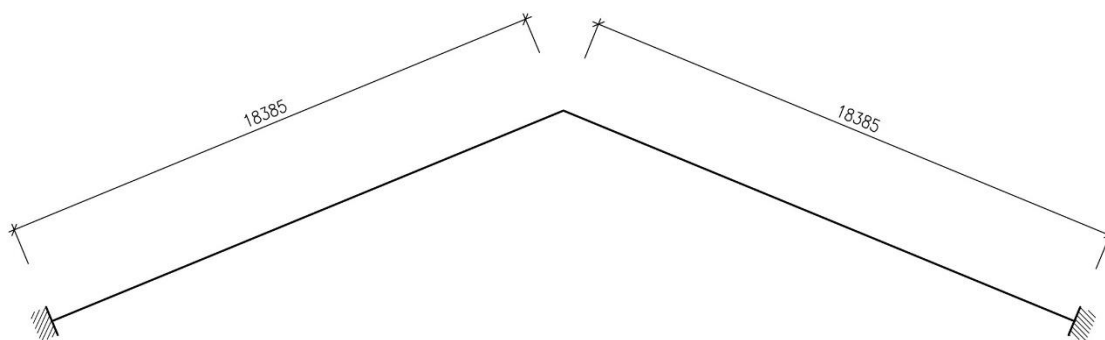


Obr. 13. Průhyb mostovky po druhém kroku rektifikace



Obr. 14. Průběh ohybových momentů po druhém kroku rektifikace

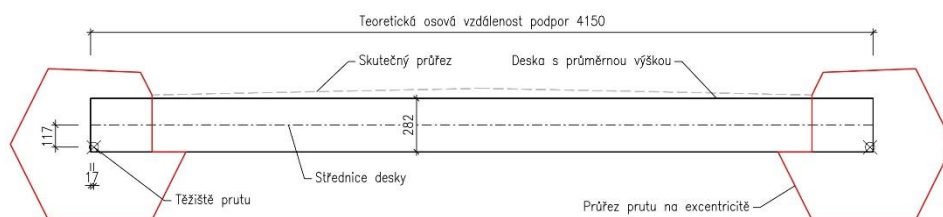
6.2. Model pro zatížení větrem



Obr. 15. Statické schéma pro zatížení větrem

Pro výpočet vnitřních sil od zatížení větrem a porovnání výsledků výpočtu momentů druhého řádu byl vytvořen prutový model v prostoru XYZ. Pruty mají průřez pylonu na konci prutů je vymodelováno vetknutím odebráním všech stupňů volnosti jak posunů, tak pootočení. Pruty jsou rámově spojeny. Na tomto modelu lze demonstrovat rozdílné chování konstrukce při zatížení ve vodorovné a příčném směru.

6.3. Deskový model



Obr. 16. Příčný řez náhradním deskovým modelem

Deskový model byl použit pro výpočet vnitřních sil v desce mostovky. Konstrukce byla vymodelována jako prostorová v souřadnicích XYZ. Kvůli složitému tvaru mostovky se modelový tvar zjednodušil na desku s průměrnou výškou podepíranou na podélných stranách prutem na excentricitě, který měl tvar trámu mostovky. Dále byli vymodelovány kloubové posuvné podpory v místě závěsů, tak že jim byla odebrána volnost ve směru Z. Následně byl na obou koncích desky v příčném směru vymodelován příčník prvkem žebro, kterému byla přiřazena efektivní šířka 1 m, bylo tak zohledněno spolupůsobení s deskou. Podepření na koncích desky bylo realizováno pomocí kloubových podpor odebráním volnosti ve směru Z a dále ve směru X a Y, tak aby konstrukce mohla volně dilatovat směrem od pevné podpory a uložení odpovídalo předpokládanému skutečnému podepření.

7. PŘEDPĚTÍ KONSTRUKCE

Vzhledem ke statickému působení konstrukce, kde mostovka plní funkci táhla, bylo třeba omezit tahová napětí vnesením tlakové rezervy, aby nedocházelo k potrhání průřezu a tím k jeho oslabení.

Návrh předpínací síly byl proveden s jednoduchým předpokladem, že maximální moment od časté kombinace, by neměl vyvolat tahová napětí ve vláknech průřezu.

Z podmínky bylo navrženo 60 lan rozdělených do 4 kabelů po 15 lanech. Mostovka je navržena jako centricky předpjatá. Trasa kabelů je zakřivená kvůli zohlednění náběhu konstrukce, kde kabely kopírují tvar střednice. Výpočet ztrát byl proveden pro průměrný kabel. Po výpočtu výztuže desky bylo zjištěno, že betonářská výztuž je v kolizi s jedním z kanálků předpínací výztuže. Proto se kanálky souměrně posunuly, tak aby se trasa průměrného kabelu nezměnila. Tato změna polohy kabelů se zohlednila při výpočtu kotevní oblasti.

7.1. Změna přepětí

Krátkodobé a dlouhodobé změny předpětí byly předpokládány 10 %. Výpočet ztrát byl proveden ručním výpočtem pro kvazistálou kombinaci. Změny předpětí pružným přetvořením od proměnného zatížení se zanedbaly.

Krátkodobé ztráty byly spočítány s vlivem třením, pokluzem v kotvě, okamžitou deformací betonu a relaxací předpínací výztuže. Hodnota krátkodobé ztráty pro posuzovaný řez $x = 2,625$ m je 9,57 %, což splňuje předpoklad 10 %. V řezu $x = 0$ m je výsledná ztráta 10,05 %, ale vzhledem k tomu, že při výpočtu byl zanedbán náběh konstrukce, tak hodnoty na konci konstrukce nebyly brány jako rozhodující.

Dlouhodobé ztráty byly spočítány pro kvazistálou kombinaci s vlivem smršťování a dotvarováním betonu, pružným přetvořením od ostatního stálého zatížení a dlouhodobé relaxace výztuže. Výsledná hodnota dlouhodobých ztrát je 8,20 %.

8. MATERIÁL

Použité materiály byly zvoleny, tak aby dokázaly přenést zatížení a umožnily funkčnost konstrukce po celou dobu životnosti.

Mostovka	Beton C45/55
Pylon	Beton C45/55 (<i>vrcholový dílec bude z oceli S355</i>)
Závěsy	Ocel Macalloy 460
Betonářská výztuž	Ocel B550 B
Předpínací výztuž	Ocel Y 1860 S7-15,3

9. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Části konstrukce a jejich rozměry, které nejsou součástí řešení tohoto projektu byly odvozeny na základě předchozích zkušeností a předpokládaných konstrukčních požadavků.

Založení mostu bude provedeno na pilotách o průměru 600 mm a budou vetknuty do skalního podloží. Dříky opěr budou lícovat s protipovodňovými zdmi, které budou v rámci výstavby částečně zrekonstruovány, čím se docílí možnosti směrové úpravy koryta k dosažení kolmého překlenutí toku. Na obou opěrách jsou navržena zavěšená křídla.

Přístupová rampa na pravém břehu bude tvořena betonovou konstrukcí na konci opřenou o mostní křídla. Vznikne tak ucelené napojení na mostní konstrukci a omezí se objem výkopových prací.

Nosná konstrukce se uloží na elastomerová ložiska rozměru 200x400 mm tak, aby bylo docíleno kloubového uložení konstrukce. K volné dilataci konstrukce budou provedeny elastické mostní závěry.

Mostovka bude monoliticky vybetonována na místě. Předepnutí mostovky bude provedeno po 28 dnech od betonáže. Monolitický přípoj prefabrikovaných částí pylonu k mostovce se provede spolu s betonáží mostovky. Ocelový vrchol pylonu, se osadí před betonáží.

Rektifikaci závěsů dojde ke zvednutí mostovky ze skruže a tím aktivaci celého statického systému.

10. POSOUZENÍ KONSTRUKCE

10.1. Zatížení

Zatížení konstrukce bylo navrženo tak, aby demonstrovalo skutečné zatížení konstrukce. Dynamické účinky zatížení, zatížení teplotou a účinky větru na celou konstrukci nejsou součástí této práce.

Hodnoty jednotlivých zatížení jsou podrobně vypočítané a popsány ve statickém výpočtu.

10.1.1. Vlastní tíha

Vlastní tíha konstrukce odpovídá tíze základního modelu. Byly zanedbány některé části konstrukce, jako jsou kotevní prvky závěsů a příčník s náběhem na konci mostovky.

10.1.2. Ostatní stálé

Zahrnuje tíhu mostního vybavení a předpokládanou úpravu povrchu mostovky.

10.1.3. Přetvoření závěsů

Přetvoření závěsů bylo částečně určeno ručním výpočtem a poté iteračně upraveno ve výpočtovém programu. Iterační proces se opakoval po vnesení předpětí do konstrukce.

10.1.4. Předpětí

Po výpočtu přepínací síly byla tato síla vložena do základního výpočtového modelu jako ekvivalentní zatížení. S touto silou se pak provedli jednotlivé posudky konstrukce.

10.1.5. Zatížení chodci

Zatížení chodci je uvažováno ve dvou, respektive ve třech stavech. První stav je plné plošné zatížení po celé délce konstrukce. Druhý stav je plošné zatížení pouze na jedné polovině konstrukce, respektive třetí zatěžovací stav na druhé polovině konstrukce. Vzhledem ke symetrii lze pro zjednodušení vynechat třetí stav.

10.1.6. Zatížení větrem

Zatížení větrem se použilo pouze pro výpočet vnitřních sil v pylonu na modelu pro zatížení větrem. Výpočet zatížení byl proveden podle normových vztahů, které vychází z charakteristiky prostředí a konstrukce

10.2. Mezní stav použitelnosti

Mezním stavem použitelnosti bylo ověřeno pouze omezení napětí v jednotlivých částech konstrukce. S kombinacemi odpovídajícím:

1. Charakteristickým hodnotám v čase $t=0$ a $t=\infty$
2. Časté kombinaci v čase $t=\infty$
3. Kvazistálé kombinaci v čase $t=\infty$

Podrobný popis kombinací s použitými kombinačními součiniteli jsou součástí statického výpočtu.

10.2.1. Výsledné hodnoty

Napětí v průřezu mostovky

V celém průřezu mostovky nevznikají tahová napětí, je tak zabráněno vzniku trhlin. Rozhodující napětí vznikají v horních vláknech průřezu hodnoty pro maximální namáhání od jednotlivých kombinací jsou

1. Charakteristická kombinace v čase $t = 0$

$$\sigma_c \leq -0,6 f_{ck}$$
$$-5,61 \leq -27 \text{ MPa}$$

2. Častá kombinace v čase $t = \infty$

$$\sigma_c \leq -0,6 f_{ck}$$
$$-5,54 \leq -27 \text{ MPa}$$

3. Kvazistálá kombinace $t = \infty$

$$\sigma_c \leq -0,45 f_{ck}$$
$$-5,56 \leq -20,25 \text{ MPa}$$

4. Charakteristická kombinace v čase $t = \infty$

$$\sigma_c \leq -0,6 f_{ck}$$
$$-5,51 \leq -27 \text{ MPa}$$

Všechny podmínky jsou splněny

Napětí v předpínací výztuži

Omezující podmínka

$$\sigma_{p,m0} \leq 0,75 f_{pk}$$
$$-1334,76 \leq 1860 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna

Napětí v lanech závěsu

Omezující podmínka platí pro častou kombinace v $t = \infty$

$$\sigma_x \leq 0,45 f_{pk}$$
$$209,95 \leq 274,5 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna

10.3. Mezní stav únosnosti

Ověření únosnosti jednotlivých prvků konstrukce bylo provedeno na hodnotách vnitřních sil odpovídající kombinacím 6.10a a 6.10b.

10.3.1. Únosnost mostovky

Únosnost mostovky byla ověřena pro podélný a příčný směr pro maximální namáhání ohybovým momentem a posouvající silou.

Posouzení na ohyb

Pro ověření únosnosti v podélném směru mostovky bylo nutné zohlednit spolupůsobení desky a trámu a ověřit započitatelnost předpínací výztuže. Vzhledem k tomu, že předpínací výztuž lze započítat do únosnosti mostovky, jak pro moment v poli, tak nad podporou, je únosnost bez betonářské výztuže dostačující. Proto byla zvolena pouze konstrukční výztuž pruty Ø14.

Únosnost v poli pro $x = 1,063 \text{ m}$

$$M_{ed} < M_{rd}$$

$$526,96 < 2085,92 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Únosnost nad podporou $x = 17 \text{ m}$

$$M_{ed} < M_{rd}$$

$$303,96 < 2976,76 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Průřez vyhoví

Posouzení na smyk

Bylo nutné ověřit vznik trhlin na efektivním průřezu mostovky pro návrhové hodnoty zatížení.

Maximální napětí pro vznik trhlin vzniká dolních vlákních v průřezu $x = 1,063 \text{ m}$ a splňuje podmínku

$$\sigma_c < f_{ctd}$$

$$0,79 < 1,8 \text{ MPa}$$

Podmínka je splněna

Smyková únosnost byla počítána na nepotrhaném průřezu. Posouzení na smyk bylo ověřeno na maximální posouvající síle.

Smyková únosnost nad podporou $x = 29,75 \text{ m}$ (pro 1 trám mostovky)

$$0,5 \cdot V_{ed} < V_{rdc}$$

$$128,52 < 1492,79 \text{ kN}$$

Průřez vyhoví

Z podmínky vyplývá, že lze navrhnout pouze konstrukční smykovou výztuž. Byly zvoleny čtyřstřížné třmínky Ø10 s osovou vzdáleností po 200 mm, které budou lokálně zhuštěny v místě závěsů v osové vzdálenosti po 100 mm.

Posouzení v příčném směru na ohyb

Vnitřní síly byly odečteny z deskového modelu konstrukce. Posouzení bylo provedeno na desce s náhradní výškou $h = 282$ mm. Ve výpočtu byla zavedena rezerva, která zohledňuje působení podélného smyku, který se v tomto projektu nepočítá.

Únosnost desky pro maximální moment v poli desky

$$M_{ed} < M_{rd} \\ 27,56 < 78,44 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Průřez vyhoví.

Výztuž byla určena Ø14 s osovou vzdáleností po 200 mm roznášecí výztuž při horním povrchu bude Ø10 s osovou vzdáleností po 200 mm a bude lokálně zhuštěna v místě závěsů v osové vzdálenosti po 100 mm.

10.3.2. Únosnost závěsů

Posouzení závěsů bylo provedeno pro maximální normálovou sílu od návrhového zatížení, která vzniká v krajním závěsu.

Únosnost závěsu

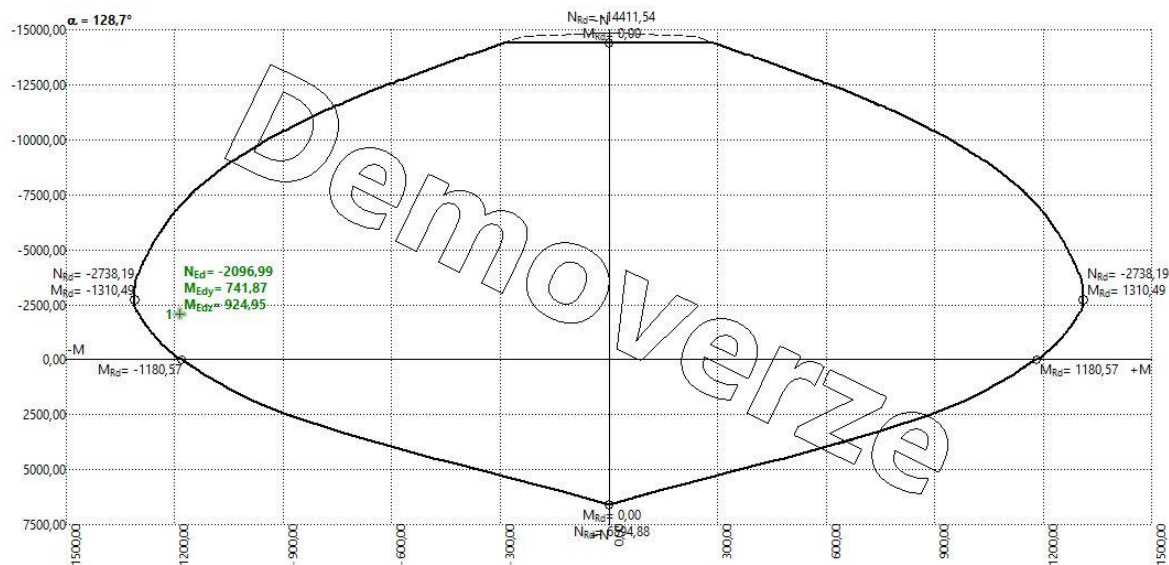
$$N_{ed} < F_{pd} \\ 461,80 < 754,4 \text{ kN}$$

Průřez vyhoví

10.3.3. Únosnost pylonu

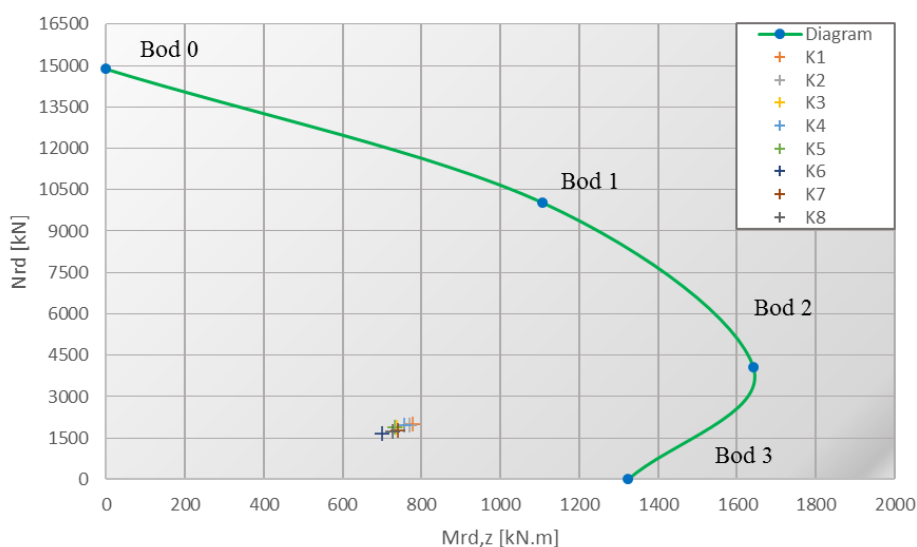
Vzhledem ke dvojsoému namáhání, bylo posouzení pylonu zjednodušeno pro jednotlivé směry. Únosnost pro daný směr byla ověřena pomocí interakčního diagramu. Hodnoty jednotlivých bodů byly spočítány ručním výpočtem, kde byla navržena poměrně velká rezerva v únosnosti. Pro upřesnění únosnosti dvojsoe namáhaného prutu bylo provedeno porovnání a posouzení v programu FIN EC beton. Účinky vzpěru byly zohledněny výpočtem druhého řádu. Hodnoty byly ověřeny pomocí programu Scia Engineer nelineárním výpočtem. Hodnoty z výpočetního softwaru se lišily od hodnot určených podle normových vztahů. Tento rozdíl vznikl při určování vzpěrné délky, proto je provedené porovnání pouze orientační. Bylo při něm zjištěno, že výpočet účinků druhého řádu by v příčném směru mohly počítat s účinnou výškou přibližně 3,5 m. Tato hodnota nebyla dále nějak ověřena a do výpočtu se uvažovali hodnoty vypočítané s původní účinnou délkou podle normových vztahů.

Výsledné hodnoty byly porovnány grafickým způsobem na interakčním diagramu.



Obr. 17. Graf interakčního diagramu N-M z programu FIN Beton

Posouzení vrcholu pylonu směr Y-Y



Obr. 18. Graf interakčního diagramu pylonu pro jednoosé namáhání

10.4. Posouzení kotevní oblasti

V rámci návrhu předpětí bylo provedeno posouzení kotevní oblasti, kde posudek na soustředěný tlak nevyhověl. Výrobce však garantuje únosnost při dodržení konstrukčních zásad. Posudek kotevní oblasti vyhoví na návrhové hodnoty zatížení.

11. ZÁVĚR

Úkolem bakalářské práce bylo provést návrh a posouzení lávky přes řeku Jihlavu. V práci byly vypracované dvě varianty přemostění, z nichž varianta zavěšené konstrukce byla vybrána pro podrobné zpracování. Byly stanoveny základní návrhové charakteristiky rozměrů konstrukce a materiálů, ze kterých se vytvořili výpočtové modely v programu Scia Engineer. Konstrukce byla posouzena na mezní stavy použitelnosti a únosnosti. Části konstrukce, u kterých nebyla v posudku navržena betonářská výztuž se vyztužení provedlo konstrukčně. Dále byly vytvořeny přehledné a podrobné výkresy konstrukce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 1992-1-1. Navrhování betonových konstrukcí – část 1-1: Obecná pravidla
- [2] ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí – část 1-4: Obecná zatížení – zatížení větrem
- [3] ČSN 73 6214 – Navrhování betonových mostních konstrukcí
- [4] NAVRÁTIL, Jaroslav a Miloš ZICH. Předpjatý beton: Průvodce předmětem BL11. Skriptum VUT, Brno, 2006.
- [5] STRÁSKÝ, Jiří a Radim NEČAS. Betonové mosty I: Základní principy navrhování. Brno, 2006.
- [6] STRÁSKÝ, Jiří. Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges. London: Thomas Telford, 2005. ISBN 07-277-3282-X.
- [7] Macalloy tension structures [online]. 2019 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <https://macalloy.com/brochures-downloads/brochures/>
- [8] ETA 06/0006 - VSL Post-Tensioning system [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <http://www.vsl.cz/>
- [9] NEČAS, Radim, Jan KOLÁČEK a Josef PANÁČEK. BL12 – Betonové mosty I: zásady navrhování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. Studijní opory pro studijní programy s prezenční formou studia. ISBN 978-802-1449-794.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1. Podklady, studie a vizualizace

P1.01	Poklady
P1.02	Varianta A
P1.03	Varianta B
P1.04	Vizualizace

Příloha P2. Přehledné a podrobné výkresy zvoleného návrhu mostu

P2.01	Situace	1:100
P2.02	Podélný řez	1:100
P2.03	Příčný řez	1:50
P2.04	Výkres betonářské výztuže pylonu	
P2.05	Výkres betonářské výztuže mostovky	
P2.06	Výkres předpínací výztuže	
P2.07	Detail ocelové části pylonu	1:15

Příloha P3. Statický výpočet

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.	Stávající situace	11
Obr. 2.	Podélný řez.....	11
Obr. 3.	Podélný řez varianta A	12
Obr. 4.	Příčný řez varianta A	12
Obr. 5.	Podélný řez varianta B	13
Obr. 6.	Příčný řez varianta B.....	13
Obr. 7.	Průřez pylonu	15
Obr. 8.	Průřez mostovky.....	16
Obr. 9.	Průřez závěsů	16
Obr. 10.	Statické schéma základního modelu	17
Obr. 11.	Průhyb mostovky bez rektifikace	18
Obr. 12.	Průhyb mostovky po vyrovnání.....	18
Obr. 13.	Průhyb mostovky po druhém kroku rektifikace.....	19
Obr. 14.	Průběh ohybových momentů po druhém kroku rektifikace.....	19
Obr. 15.	Statické schéma pro zatížení větrem	19
Obr. 16.	Příčný řez náhradním deskovým modelem.....	20
Obr. 17.	Graf interakčního diagramu N-M z programu FIN Beton.....	28
Obr. 18.	Graf interakčního diagramu pylonu pro jednoosé namáhání	28